

高密度航空レーザ測量による 震災時の道路土構造物点検の適用可能性



小林 浩* 渋谷 研一*

1. はじめに

近年、測量技術の分野では、国土情報の電子化にむけたGISの整備・普及や、国民の安全確保を目的としたハザードマップ整備事業のように、詳細で正確かつ効果的な情報の提供がますます求められている。航空レーザ測量はこれに応える重要な技術の1つであると考えられている¹⁾。航空レーザ測量は、写真という中間媒体を必要とせずに、レーザを利用して直接対象地域の3次元の地形データを取得できる。つまり、従来の航空写真測量における写真に関する工程が不要であり、処理時間の短縮化や人的要因の誤差を少なくする事が可能な手法であるといえる。

災害時の航空測量の役割をみると、阪神・淡路大震災の時は、航空写真による情報は避難・救護・輸送計画に唯一とも言うべき重要な役割を担っていた。しかし現在は、地震発生時の即応体制の整備が進んで来ており、国土交通省が直轄管理をしている国道や日本道路公団が管理をしている高速自動車国道では、災害発生から数時間後にはほとんどの被災状況が把握できる体制が整えられている。例えば、平成16年(2004年)新潟県中越地震の際、国土交通省長岡国道事務所では、管内の国道8号、国道17号、国道116号に対して3時間後には被災箇所が概ね掴め²⁾、ただちに緊急復旧に取りかかり30時間後にはほとんどの箇所でも車両通行が可能となった³⁾。また日本道路公団では、関越自動車道・北陸自動

車道に対して3時間後には被災区間が特定され、9時間後には緊急復旧工事を開始し、19時間後には緊急交通路としての通路が確保された⁴⁾。

一方県や市管理の県道・市道に関しては、管理すべき対象距離が長いこと、管理に割ける要員が十分に確保できないこと等の問題点があった。例えば、新潟県中越地震の際、新潟県土木部監理課・道路管理課では、災害状況の大勢把握に震災翌日一杯を要した。これには職員・消防団・建設業界・地域住民からの情報や測量業者からの情報提供などが基となった。その結果震災翌日以降、県管理の国道から応急作業が順次開始された⁵⁾。また十日町市建設課では、震災翌日朝に車で行ける範囲内で被災状況の把握をおこなった。ただし市道は400kmあり、生活に必要な道路のみを調査した。なお国土地理院が公開した航空写真で山地の被害状況の抽出を試みたが、撮影高度が高すぎて分からなかったとの指摘があった⁵⁾。

このように、直轄国道・高速自動車国道では発災後数時間で被害把握が概ね完了したのに対し、県管理の道路では航空写真等も活用しつつ被害の大勢の把握に約1日を要し、市町村においては優先度の高い道路から被害把握を行った様子が伺える。

災害対応体制の整備が進展すると共に、直轄国道・高速自動車国道などの主要幹線に対しては災害発生後に短時間での被災状況の点検が可能となり、災害直後の航空測量の重要度は下がってきている。しかし県や市管理の

* 朝日航洋株式会社

県道・市道に関しては、上空からの被災状況の把握への需要がむしろ高くなっていると考えられる。

本報告では、航空測量の中でも、航空写真測量と比較し短時間で高密度で3次元計測が可能である航空レーザに着目し、災害直後の道路被災の抽出（通行の可否の判断）が可能なかどうかの検討を行なった。

2. 検討方法

本報告では、航空レーザ測量成果を基に災害直後に道路の通行の可否の判断が行えるかの検討を、道路被災箇所抽出の為に必要条件と抽出手法の面から図. 1 に示す流れで行った。

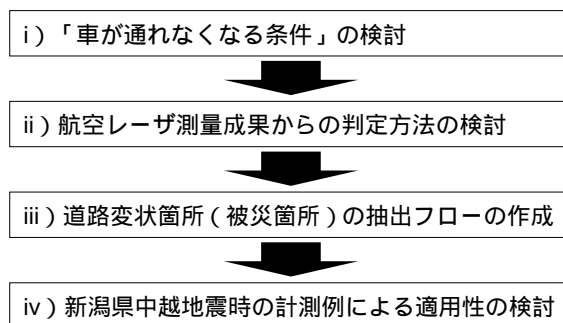


図. 1 検討手順

- i) 道路の被災箇所の抽出を行う為に必要な条件として、「車が通れなくなる条件」すなわちどの程度の道路変状で車が通れなくなるか、の検討を行った。
- ii) 「レーザ測量成果での判定・判読基準」として、車が通れなくなる道路変状はどの様に判定できるか、の検討を行った。
- iii) ii) で作成した判定・判読基準を基に「道路変状箇所(被災箇所)の抽出フロー」の作成を行った。
- iv) 2004年10月23日に発生した新潟県中越地震後に収録した航空レーザ測量成果を用いて、iii) で検討した抽出フローの妥当性について検証と問題点の抽出を行い、災害直後の道路被災の抽出（通行の

可否の判断）が可能かどうかの適用性の検討を行なった。

それぞれについて、以下に述べる。

2.1 「車が通れなくなる条件」の検討

航空レーザ測量成果を用いた道路被災の抽出を行うためには、道路がどのような条件で通行不能となるかを考える必要がある。道路が通行不能となる条件には、斜面崩壊による崩土の堆積や路体構造物の沈下崩落等による段差発生等の走行部分の変状、路体構造物の強度低下、水没、周辺地域の延焼等走行環境の悪化などが考えられる。本報告では、航空レーザ測量の特徴である3次元計測の成果の活用を対象としているため、道路走行部分の変状（段差、陥没等）を対象として検討した。次に道路走行部分ではどのような変状が発生し、変状がどの程度になれば車が通行できないかについて、2003年に発生した宮城県北部地震・十勝沖地震での被災事例を基に検討した。表. 1 には、宮城県北部地震での道路災害事例⁶⁾、平成15年十勝沖地震での道路災害事例⁷⁾より、道路に段差を生じて通行規制に至った事例の中から、生じた段差の変位量が測定されている事例数とその変位量の平均値を示した。表. 1 によれば、変位量4cmの事例（垂直方向の変位よりも水平方向の変位により通行止めになった事例）を除くと、事例数は少ないが15cm以上の段差が発生すると通行規制が発生すると考えられる。そこで、本報告では道路面に15cm以上の段差が発生する場合を「車が通れなくなる条件」とした。

なお、道路面の水平方向の空隙の発生、すなわち亀裂や分離によっても「車が通れなくなる条件」となりうるが、空隙の幅や形状と通行の可否について定量的に検討できる資料が集まらなかったため、本報告では検討対象とはしなかった。

表. 1 発生段差パターンと事例数

段差パターン	事 象	垂直方向の変位量が測定されていた事例数	変位量の平均値
横断及び斜め（路面）	盛土・切土の変化部分での移動	3 例 （宮城 2、十勝 1）	15cm
斜め（路面）	沢地形における高盛土区間での移動 （円弧状のクラックなど）	1 例 （十勝 1）	17cm
斜め（路面）	歩道・路肩部分での水平・垂直の移動 （盛土のはらみ出しなど）	1 例 （十勝 1）	60cm
横断及び斜め（路面）	暗渠等の圧壊によるクラックの発生 （水路などに沿ったクラックなど）		
横断（橋脚）	支承部分の破損による路面の上下左右 方向のずれ	1 例 （宮城 1）	4cm
横断（橋脚）	橋梁と取り付け道路の間での段差の発生 （橋台背面の盛土沈下）	1 例 （十勝 1）	40cm

2.2 判定・判読基準

3次元メッシュデータの表現には、陰影図、メッシュ毎の傾斜を用いた傾斜区分図、断面図等があげられる。

2.1節において、「車が通れなくなる条件」を垂直変位量15cmとした。ここでは、各表現毎に垂直変位量15cmがどのように見えるかの検討を、段差、陥没を想定したテスト3次元モデル（図. 2）を用いて行った。このモデルでは、断面1に示すようにy方向に左側が右側と比べ15cm高い段差を、また断面2に示すようにX方向に幅15cm深さ15cmまたは30cmの溝をそれぞれ設定した。なお、ここでは地形モデルのメッシュサイズを50cmとした。これは

後述する検証データがデータ取得密度4点/m²以上であり十分50cmメッシュでの地形モデル作成が可能であったためである。当然、データ取得密度が低ければ地形モデルは粗くなり、以下にのべる解析にも大きく影響してくる。

2.2.1 傾斜区分による表現と判定基準

傾斜区分図とは、ある区画内の標高点を偏微分して求めた仮想斜面の傾斜角度の分布を示した図である。仮想斜面上の任意の点における傾斜角 S_T の算出式を式（1）に示す。

図. 3 に示す算出概念を基に0.15mの段差をメッシュサイズ50cmで算出すると、傾斜角 S_T

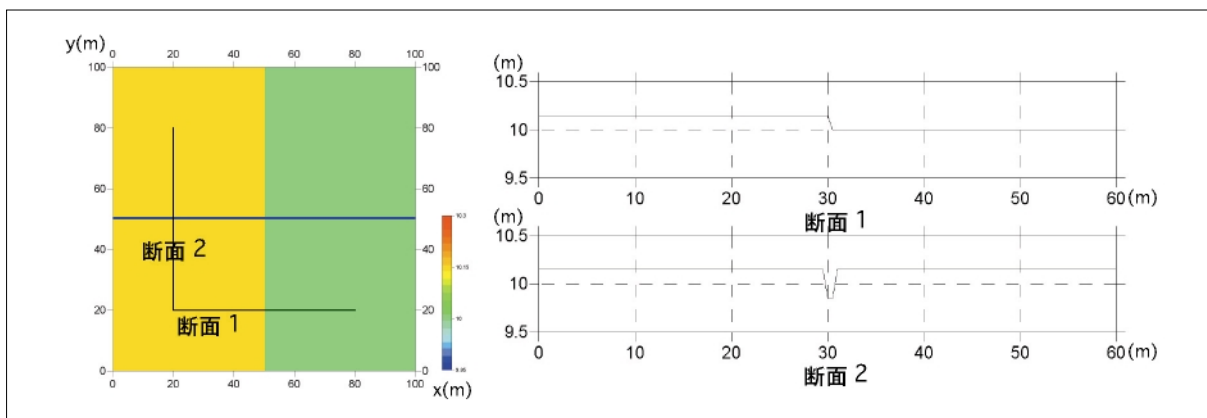


図. 2 テスト3次元モデルと断面図

は(1)式から求められ、 8° (Z_W, Z_E, Z_N, Z_S の内1つだけ0.15m変化している場合)~ 12° (Z_W, Z_E, Z_N, Z_S の内、直交方向の2つが0.15m変化している場合)となる。

図.4(左)は、図.3の3次元モデルを基に作成した傾斜区分図であり、図.4(右)は、傾斜が 8° 以上の箇所を色づけした傾斜区分図である。

道路走行面は一般に水平に近い場合、変状等がなければ傾斜区分図では白色で表示されることが考えられる。従って、道路走行面中に段

差が生じた場合、傾斜 8° 以上を明瞭に区分できるように表現とすれば、図.4(右)のように変状箇所が明瞭に判定できることが期待される。以上の結果を基に、本報告では、傾斜区分図を用いた道路被災の判定基準を、 8° 以上とした。

2.2.2 陰影図による表現と判読基準

陰影図とは光線ベクトルと斜面の法線ベクトルのなす角を基に算出する分光輝度分布である。分光輝度は光線ベクトルと斜面の法線ベクトルが 90° のときに最も高くなる。従って、段差部分は段差部分の法線ベクトルに応じて変化する分光輝度の変化で示される。陰影図の作成式を式(2)に示す²⁾。また式中の角度 i について図.5に示す。

図.6は一般的に作成される左斜め上(水平角 135° 、傾斜角 45°)を光源とした陰影図である。陰影図での段差は分光輝度を白黒の濃淡で示した場合、濃淡の変化で表現される。

一般的な陰影図(図.6)では、変状がある事は判るが、変状の状況を判読する事は難しい。本報告では、道路面の変状の状況の判読を行う為に、光源方向の異なる複数の陰影図を基に判読を行う手法を検討した。検討は、図.2のテストモデルの上下左右4方向を光源

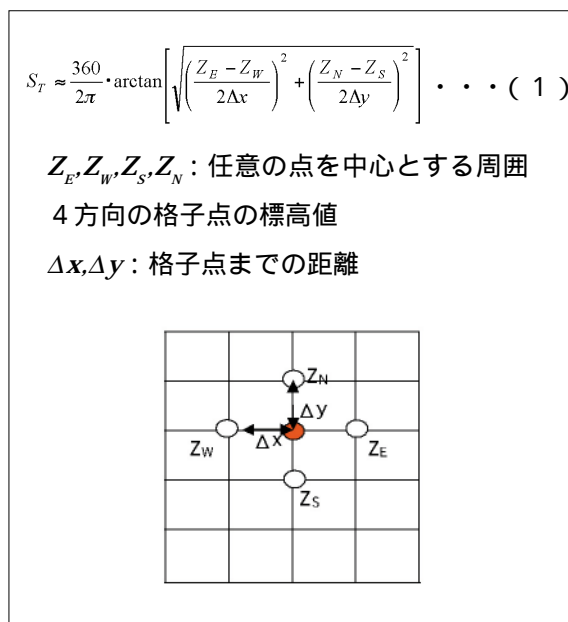


図.3 傾斜角 S_T の算出方法

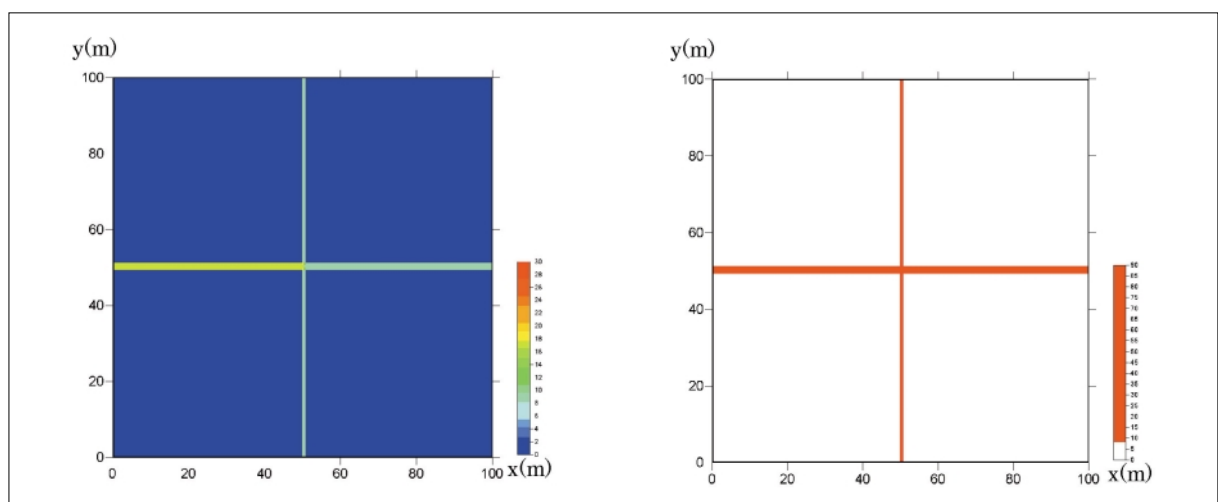


図.4 傾斜区分図(左:テストモデルから作成した傾斜区分図、右:傾斜 8° 以上を区分した図)

とした陰影図を作成し、片側に段差が発生している場合（図.7）及び陥没が発生している場合（図.8）を想定して行った。

図.7に示すように、段差が生じている状況（テストモデルでは $x=50\text{m}$ を中心に左側の高さが 10.15m 、右側が 10.00m と左側のみが高い状況）では、高い側を光源とした場合は段差部分が黒く、低い側を光源とした場合は段差部分が白くなる。

$$I_{\lambda} = \pi F_{\lambda} \frac{A_{\lambda}}{\pi} \cos i \cdot e^{-\left(1 + \frac{1}{\cos \theta_0}\right) \tau_{\lambda}} \cdots (2)$$

I : 分光放射強度

πF : 大気圏外対応分光放射束

A : 反射率

$\cos i$: $\vec{h} \cdot \vec{s}$

\vec{h} : 斜面に垂直な単位ベクトル

\vec{s} : 太陽方向を示す単位ベクトル

θ : 太陽光の入射角

τ : 大気の光学的パラメータ

λ : 中心波長

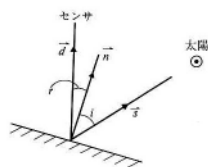


図.5 陰影図作成の概念

図.8に示すように、陥没が生じている状況（テストモデルでは、 $y=50\text{m}$ において X 軸方向に、左半部では深さ 0.3m 、右半部では深さ 0.15m 、幅は双方とも 0.15m の陥没が生じている状況）では、光源側が黒く、光源の反対側が白くなる。また、陥没が深い方が、明暗がはっきりする。

以上の結果を基に、本報告では、陰影図を用いた道路被災状況の判読基準を、表.2～表.3に示すように作成した。

2.3 道路被災箇所の抽出フロー

災害直後の道路変状箇所（道路被災箇所）の抽出手法を、以下の2点に留意して検討した。

- ・レーザ計測・処理後の道路周辺の航空レー

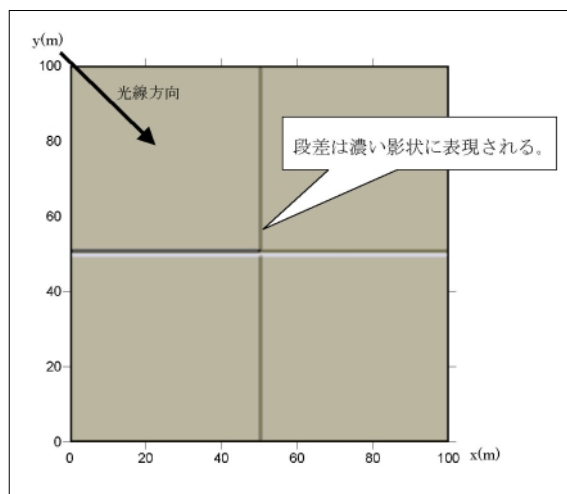


図.6 テスト3次元モデルで作成した陰影図

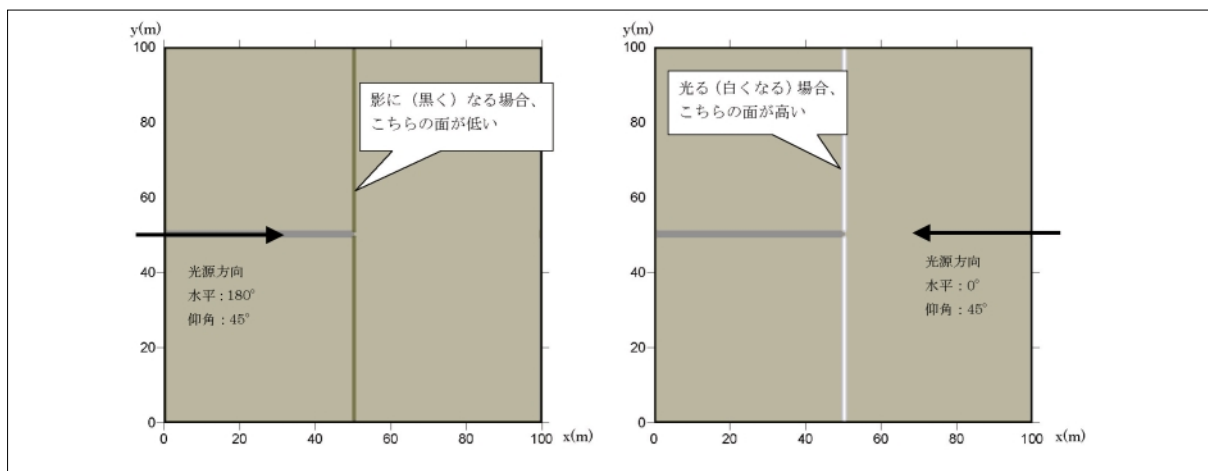


図.7 段差の場合の陰影図での見え方

ザ測量成果を基に、レーザ測量成果から傾斜区分図を作成、傾斜区分による通行可否の判定を行う。

・通れない可能性がある箇所に対し航空レーザ測量成果を基に作成した陰影図（昼間で写真がある場合はそれも併用する）から被災状況の判読を行う。

検討した抽出手法は、最初に傾斜区分図を用い道路が通れない可能性のある範囲を傾斜区分図より抽出、抽出された範囲に対して複数光源からの陰影図を作成し被災状況の判読を行う抽出フローとした。作成した抽出フローを図.9に示す。尚、抽出フロー内の判定基準と判読基準は、2.2.2項での判定・判読基準を用いた。

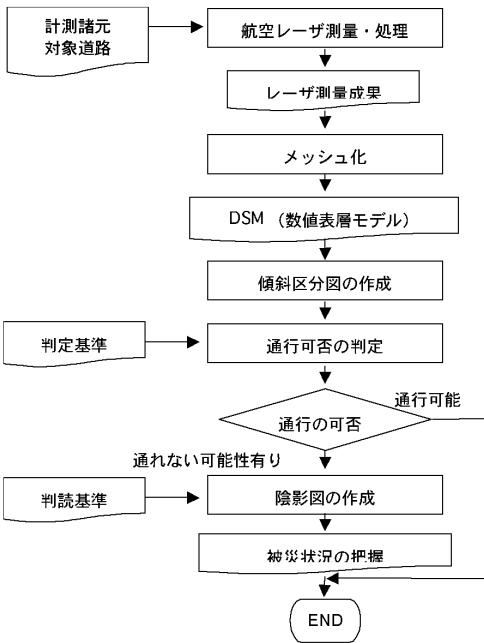


図.9 レーザ測量成果を用いた道路被災状況の抽出フロー

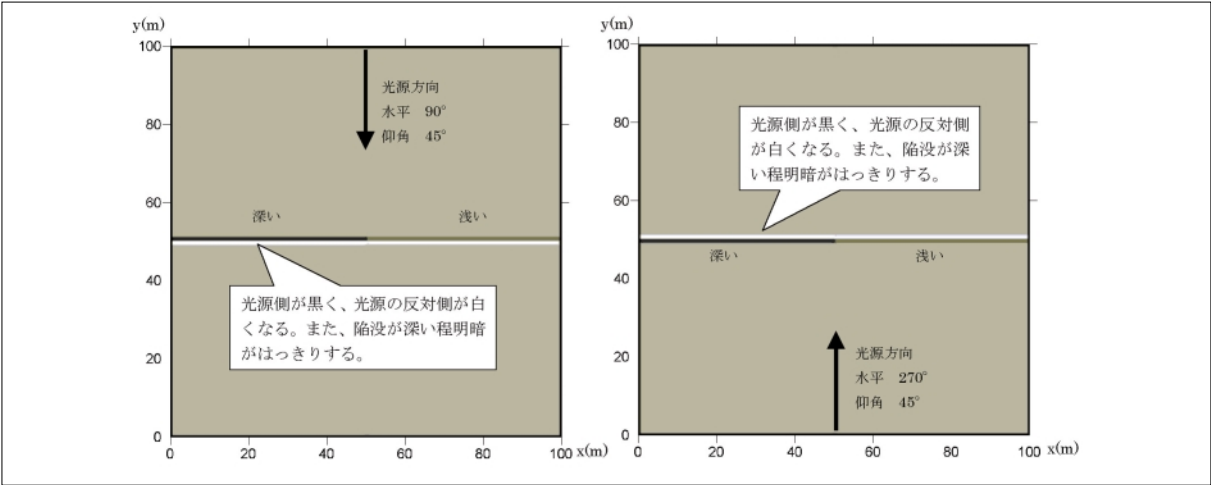


図.8 陥没の場合の陰影図の見え方

表.2 道路の延長方向とその逆方向を光源とした場合の判読基準

陰影図での状況	判 定	想定される事象
どちらからか方向のみ影となった場合	段差発生	橋台の取り付け盛土の沈下や盛土区間の沈下
両方が影となった場合	陥没	道路を横断するカルバート等の破損
両方が光った場合	隆起	道路を横断するカルバート等の浮き上り

表.3 道路直交方向として道路の左右から光をあてた場合の判読基準

陰影図での状況	判 定	想定される事象
どちらからか方向のみ影となった場合	段差発生	片切片盛の道路での盛土部全体の沈下や盛土区間の路肩部のすべりによる沈下道路を横断するカルバート等の破損
両方が影となった場合	陥没	盛土のすべりによる道路延長方向に伸びる亀裂
両方が光った場合	隆起	道路延長方向に伸びる擁壁や斜面で生じたすべり面末端での圧縮亀裂など

3. 新潟県中越地震での適用例

本章では、2.2節で作成した抽出フローを、新潟県中越の際に関越自動車道の小出IC～越後川口S.A間を対象に収録した航空レーザ測量成果に対し適用した。

使用した航空レーザ測量諸元を表.4に、震災発生から計測時までの航空レーザ測量成果の取得までについて表.5に、本報告で検討に用いた範囲について図.10に示す。

3.1 DSMの作成

航空レーザ測量成果からDSM（数値表層モデル）を作成するには、メッシュ処理のアルゴリズムに基づくメッシュ化が必要である。

本報告では、メッシュ処理のアルゴリズム

表.4 計測諸元

項 目	諸 元
使用機材	ALMAPS - G4
レーザ周波数	100,000Hz
計測機体	ヘリコプター
計測高度(H)	800m（対地）
計測速度	120km/h
スキャン角	44度（高度800m時の1測線の計測幅約700m）
計測精度 （機械精度）	水平方向：±0.27m（対地高度の1/3000） 垂直方向：±0.15m
計測密度	7.0点/m ² （実績）

ここでいう計測精度は、個々の計測データの絶対値に対する精度であり、地形モデル中の相対形状に対する誤差ではない。

表.5 地震発生から航空レーザ測量成果の取得までの経過

日 時	経過時間	状 況
10/23 17:56	0 : 00	本震発生
20 : 00	2 : 00	フライト決定
10/24 09:00	15 : 00	撮影箇所決定・指示
10 : 00	16 : 00	レーザ機離陸（群馬HP）
11:00～15:00	17:00～21:00	計測
16 : 00	22 : 00	データ発送（群馬HP）
18 : 00	24 : 00	データ到着（川越センター）
24 : 00	30 : 00	レーザ測量成果の完成

として、計測密度が高いこと（本章で検討に用いた航空レーザ測量成果で7.0点/m²）処理速度が速いこと（災害直後の道路被災の抽出には早い時間での報告が必要）を考慮し、最近隣内挿法を選択した。

最近隣内挿法とは、内挿点に最も近いレーザ計測点を採用する手法である¹⁾。図.11に検討範囲のDSMを陰影図表現で示す。

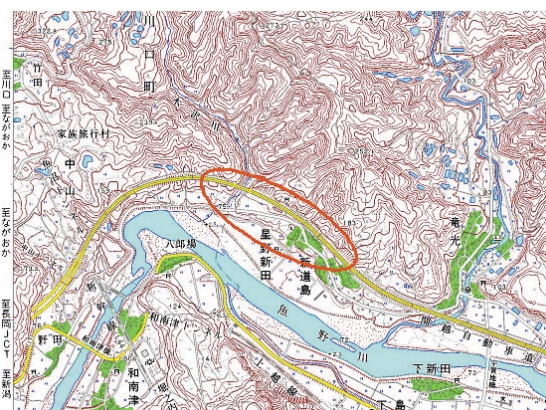


図.10 検討に用いた範囲
（国土地理院発行数値地図25,000を編集）

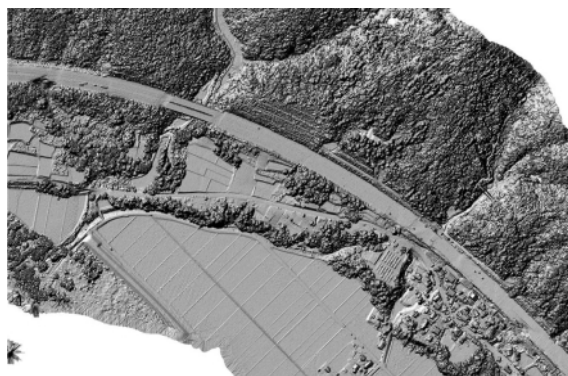


図.11 検討範囲の陰影図

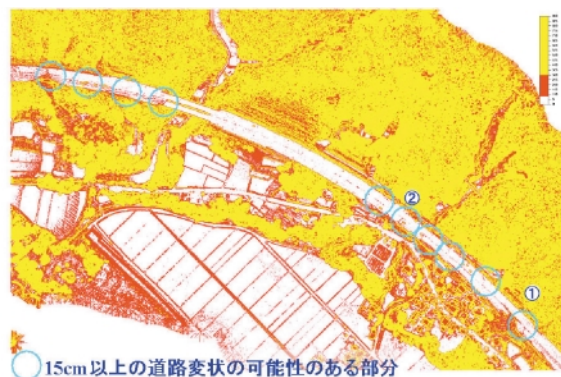


図.12 傾斜区分図と抽出された道路変状箇所

3.2 傾斜区分図による判定

対象範囲のDSMから図.3を基に作成した傾斜区分図を図.12に示す。図.12は2.3節で作成した抽出フローに基づき、 $8^{\circ} \sim 30^{\circ}$ を赤色に 30° 以上を黄色に色づけを行っている。本節では、道路上で 8° 以上の傾斜ありと解析された箇所のうち、帯状でコントラストが明瞭なものを道路変状箇所と判断し抽出した。抽出した箇所について図.12に青丸で追記した。

図.12での抽出箇所、断面図の作成と航空

写真による照合を行った。照合結果例を図.13、図.14に示す。

照合の結果、図.13、14に示すように、砂盛による擦付け済みの箇所では細かな凹凸に起因すると考えられるノイズが生じ、道路面の段差が埋められていても抽出されているが、他の箇所では道路を横断する明瞭な段差が認められる。このように、傾斜区分図による判定方法で道路変状箇所（道路被災箇所）の抽出が可能ことが確認できた。

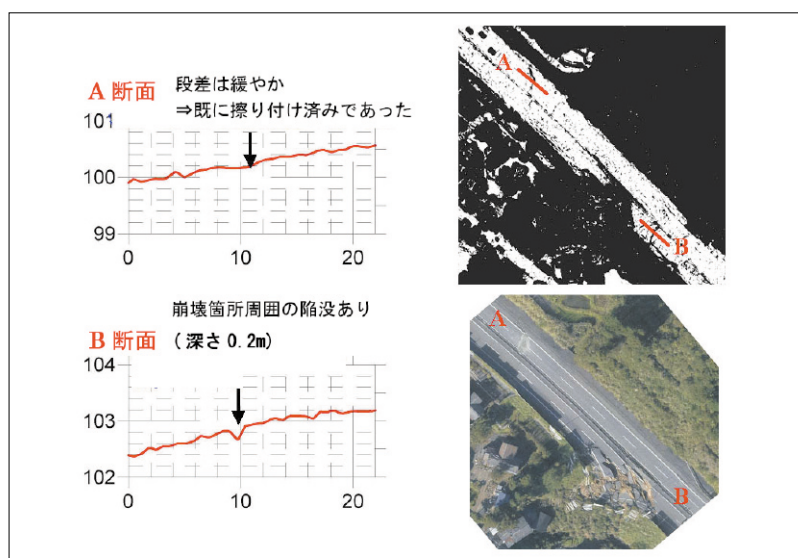


図.13 抽出箇所（図右上が傾斜角 8° 以上を黒くした傾斜区分図。同図のA、Bが断面線位置図、図左がA、B箇所の断面図、図右下が同箇所の航空写真）

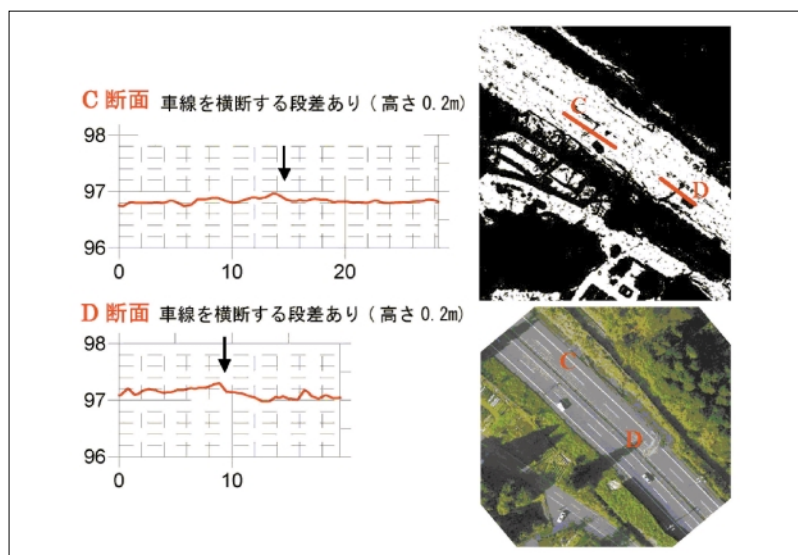


図.14 抽出箇所（図右上が傾斜角 8° 以上を黒くした傾斜区分図。同図のC、Dが断面線位置図、図左がC、D箇所の断面図、図右下が同箇所の航空写真）

3.3 陰影図による判読

対象範囲のDSMから式（2）を基に作成した光源を図左斜め上とした陰影図を図.15に示す。これに前節で抽出した道路変状箇所を重ねた。

図.15の抽出箇所を対象に、道路延長方向（上下）と道路直交方向（左右）の陰影図を

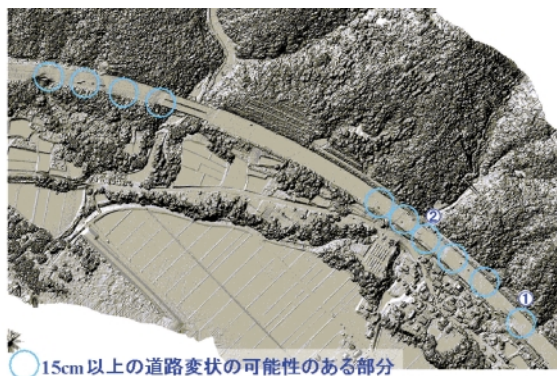


図.15 道路変状の可能性ありと判定された箇所と陰影図の重ね合わせ

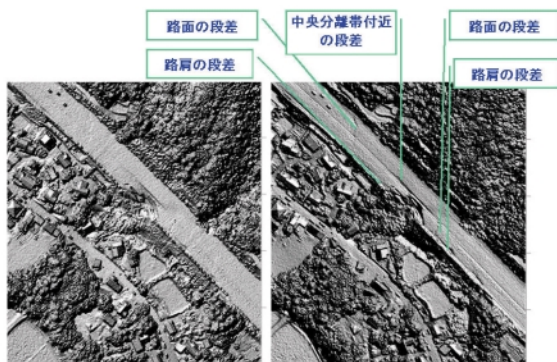


図.16 陰影図による抽出箇所 判読例（左：道路延長方向を光源、右：道路直交方向を光源）

作成し判読を行った。判読結果例として図.15の、の事例を図.16、図.17に示す。

判読の結果、道路変状箇所の凹凸について判読が行えたが、変状要因については陰影図から読み取れる周辺状況の判読が必要なこと、道路構造等の資料があると判読が容易になることもあわせて明らかとなった。

3.4 抽出に要する時間

図.9の道路被災状況抽出フローを用いて道路被災箇所を抽出するのに要する時間を図.10の範囲を対象に測定した。所要時間は、航空レーザ測量成果から対象範囲のデータを選択する作業から計測した。道路被災状況抽出フローでの各工程での所要時間と問題点について図.18と表.6に示す。

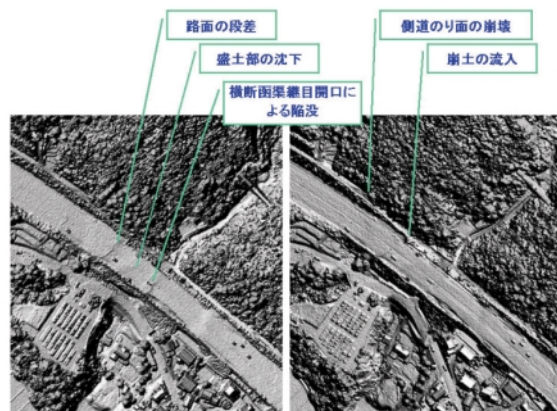


図.17 陰影図による抽出箇所 判読例（左：道路延長方向を光源、右：道路直交方向を光源）

表.6 対象範囲（延長1km）を対象とした各工程毎に要した時間

工 程	所要時間 (時間：分)	経過時間 (時間：分)	備 考
対象箇所の抽出	0：10	0：10	
メッシュ化	0：02	0：12	メッシュサイズを50cmとした。
傾斜区分図作成	0：01	0：13	
傾斜区分図判定	0：05	0：18	幅員が細い場合は道路部分の抽出に時間を要する。 既に擦付済みの箇所は検出できなかった。
陰影図作成	0：01	0：19	
陰影図判読	0：10	0：29	道路構造等の資料があると判読の時間短縮に繋がる。

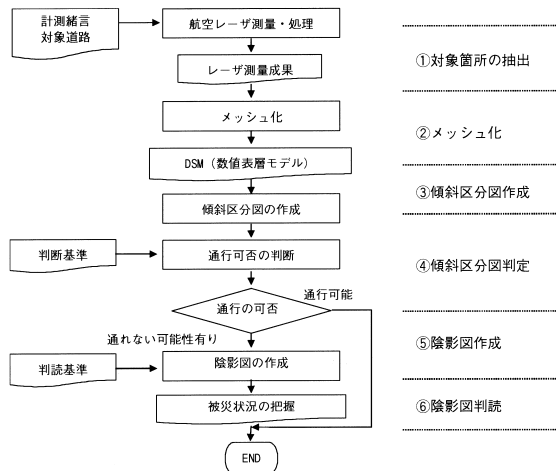


図.18 抽出フローと所要時間の計測区分

4. おわりに

本報告では、航空レーザ測量成果を用いて災害直後の道路被災状況の抽出の可能性について検討した。検討した結果、以下の項目についての知見が得られた。

- ・ 航空レーザ測量成果から道路変状を抽出可能な傾斜区分図・陰影図が作成できる
- ・ 傾斜区分図から道路変状による通行支障箇所の抽出が行える
- ・ 陰影図から通行支障箇所の支障要因の判読が行える
- ・ 抽出と判読に要する時間が、延長1kmを対象とした場合、0.5時間程度である

この手法の限界としては、以下の点が挙げられる。

- ・ すでに砂盛による擦付等応急復旧されている場合は適切に評価できない可能性がある
- ・ 樹木下の道路の検出は困難である

また今後は、幅員の狭い道路への適応の可能性、ならびに道路中心線や距離標などの既存データとの連携について、検討する必要がある。

(発表日2005年6月22日)

参考文献

- 1) 航空レーザ測量WG：航空レーザ測量ハンドブック、(財)日本測量調査技術協会、2004。
- 2) 高木幹雄・下田陽久：像解析ハンドブック(第6刷)、東京大学出版会、1995。
- 3) 国土交通省・北陸地方整備局：北陸地方整備局災害対策本部情報、http://www.hrr.mlit.go.jp/saigai/H161023/1023_top.html、2004
- 4) JH日本道路公団・北陸支社：平成16年(2004年)新潟県中越地震に伴う高速道路の被災状況及び復旧概要、<http://shin-sai-fukkyu.vis.ne.jp/hp/hisai.html>、2004。
- 5) 土木学会・第二次調査団：平成16年新潟県中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査結果と緊急提言」、<http://www.jsce.or.jp/report/32/teigen2/index.htm>、2004
- 6) 国土交通省・東北地方整備局：7.26宮城県北部を震源とする連続地震の概要、http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/miyagioki/seibikyoku/frameset_top.html、2003
- 7) 国土交通省・北海道開発局：平成15年(2003)年十勝沖地震による被害について、http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/press/press_top.html、2003

発表者紹介

小林 浩(こばやし ひろし)

所属：朝日航洋株式会社空間情報事業本部地図・コンサルタント事業部

計測・コンサルタント部 防災・環境グループ

共著

渋谷 研一：朝日航洋株式会社